

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2018.06.009

河道淤泥固化剂研发与机理探究

刘 金¹, 王 毅², 董良飞¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 中卫市玉龙水电建筑安装有限公司, 宁夏 中卫 755000)

摘要:针对河道淤泥高含水率、低强度的问题,通过单掺实验及正交实验,向淤泥中添加硅酸盐水泥、粉煤灰、KPAM(聚丙烯酸钾)、磺化油等 4 种固化材料,以固化稳定后淤泥的含水率、无侧限抗压强度为评价指标,探讨淤泥固化剂的最优药剂配比。研究表明,单独使用硅酸盐水泥、粉煤灰、KPAM 和磺化油对淤泥进行固化处理均有不同效果,但使用单一固化材料存在前期固化效果差、固化体增容大及固化成本高等问题。通过正交实验,得到前期固化减水效果最佳固化剂配比为 5% 硅酸盐水泥、6% 粉煤灰、0.2% KPAM 及 0.15% 磺化油;在养护时间达到 55 d 时,使用该配比固化处理后的淤泥无侧限抗压强度为 3.04 MPa,可满足填筑要求。固化处理后的淤泥重金属浸出实验显示,该复合固化剂对淤泥中的重金属有一定的稳定作用。利用 SEM、XRD 等观测分析淤泥内部结构,发现 KPAM 与磺化油的长链条作用使淤泥内部结构密实,水泥及粉煤灰与淤泥中水分产生的水化反应提升了固化淤泥的强度。

关键词:淤泥处理;固化材料;淤泥强度;重金属

中图分类号:X 53

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2018)06-0059-07

Research and Development of River Sludge Curing Agent and Its Mechanism

LIU Jin¹, WANG Yi², DONG Liangfei¹

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Zhongwei Yulong Water & Electricity Construction and Installation Co., Ltd., Zhongwei 755000, China)

Abstract: To solve the problem of high water content and low strength of river sludge, river polluted sludge was taken as the research object. Single mixing experiment and orthogonal experiment were carried out by adding four curing materials (Portland cement, fly ash, KPAM and sulfonated oil) in order to make sludge solidified. The moisture content and unconfined compressive strength of sludge after solidification and stabilization were taken as evaluating indicator to get the optimum composition

收稿日期:2018-06-04。

作者简介:刘金(1994—),男,江苏南通人,硕士生。通信联系人:董良飞(1972—),E-mail: dlf@cczu.edu.cn

引用本文:刘金,王毅,董良飞. 河道淤泥固化剂研发与机理探究[J]. 常州大学学报(自然科学版),2018,30(6):59-65,92.

of the sludge curing agent. The study shows that the use of Portland cement, fly ash, KPAM and sulfonated oil on the sludge has different degrees of solidification effect, but the use of a single curing material faced with some problems, such as poor early curing effect, solidified body capacity increase, and high curing cost. Through the orthogonal experiment analysis, it is concluded that the best curing material ratio is 5% for Portland cement, 6% for fly ash, 0.2% for KPAM and 0.15% for sulfonated oil. When the curing time reaches 55 d, the unconfined compressive strength of the treated sludge is 3.04 MPa, and the filling requirement can be satisfied. The leaching experiment of heavy metals on the solidified sludge showed that the compound curing agent had a certain stabilizing effect on heavy metals in sludge. By means of SEM and XRD, the internal structure of sludge is observed, and it is determined that the long chain effect of KPAM and sulfonated oil is the main cause of the internal structure of the sludge, and the hydration reaction of cement and fly ash and sludge is the main reason to enhance the strength of solidified sludge.

Key words: sludge treatment; curing materials; sludge strength; heavy metal

内陆城市湖泊河道众多,水底有大量的淤泥堆积,而淤泥的清挖和处理往往工程量大,耗资惊人^[1]。这些堆放的淤泥含水率高、强度低,还含有有毒化学物质、病原生物等有害成分。固化技术有利于淤泥的后续处置并实现资源化利用,有望解决近年来日益严重的疏浚淤泥处置问题^[2]。

国外不少发达国家采用制造高效净化燃料、建筑材料方式,对淤泥进行综合开发利用^[3]。然而在中国,由于技术与经费的限制,湖泊河道疏浚淤泥大多还是作为填筑材料^[4],通过降低淤泥的含水率,并提高淤泥的强度来满足土方填筑的要求。目前,国内普遍采用水泥类无机材料对淤泥进行固化处理^[5]。然而水泥类材料用于淤泥固结时,添加量较大,而且对高含水淤泥的固化效果较差,因此在传统固化剂如粉煤灰、水泥的基础上,探索更高效、经济的固化剂很有必要。

本文旨在针对现有固化剂所存在问题,研发一种新型聚合物复合固化剂。通过实验研究不同配比的水泥、粉煤灰、KPAM 和磺化油等对淤泥的固化作用,结合淤泥固化土的颗粒粒径、组分及抗压强度比较固化效果;通过浸出实验,研究固化剂对淤泥中重金属的固定作用;通过正交实验寻找最佳的固化剂组分比例,并采用 X 射线衍射(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)观测固化淤泥的微观结构,进行固化机理分析,为河道淤泥固化剂开发及工程应用奠定理论与应用基础。

1 材料与方法

1.1 实验材料

淤泥样品取自常州市武进区大通河湖塘老街河段,淤泥相关理化性质见表 1。

实验选用的固化材料为硅酸盐水泥、粉煤灰、KPAM 磺化油。硅酸盐水泥及粉煤灰均取自常州企润建材,为普通硅酸盐水泥,一级粉煤灰,具体成分见表 2。KPAM 购自河南濮阳某化工公司(分子式为 $(C_3H_6O_2)_n \cdot (C_3H_5KO_2)_m$,密度为 0.465 8 g/L)。磺化油购自深圳某化工公司(合成阴离子表面活性剂,纯度 75%)。

表 1 淤泥主要理化性质

pH	含水率/%	有机质含量/%	液限/%	塑限/%
7.04	70.1	27.2	60.3	29.7

表 2 水泥及粉煤灰成分表

%

样品	SiO ₂	CaO	K ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	烧失量
水泥	23.12	57.6	0.72	2.18	7.13	0.18	3.67	0.34	2.65	2.18
粉煤灰	36.65	8.78	0.86	1.66	18.89	0.35	8.02	—	0.17	24.62

1.2 实验方案

方案 1:设计 21 组单掺固化实验,其具体编号及掺量(质量分数)见表 3,其中设 1 组空白对照实验。通过分析 25d 中淤泥含水率变化情况,研究水泥、粉煤灰、KPAM 及磺化油等,在不同掺量下对淤泥的减水固化效果。

方案 2:根据方案 1 中单掺固化效果,选取 4 种固化剂中减水固化效果较好的 3 个代表性掺量,开展组合配方正交实验。正交实验因素水平设计见表 4,采用正交软件得出 9 组实验计划见表 5。按实验计划进行组合配方实验分析河道淤泥 15d 内含水率变化情况,得出最优固化材料组合配方。

表 3 单掺实验方案及掺量比例

%

编号	1	2	3	4	5
硅酸盐水泥	1	3	5	7	9
粉煤灰	2	4	6	8	10
KPAM	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
磺化油	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25

表 4 正交试验因素水平表

%

因素水平	硅酸盐水泥	粉煤灰	KPAM	磺化油
水平 1	5	4	0.15	0.05
水平 2	7	6	0.20	0.10
水平 3	9	8	0.25	0.15

说明:水平的取值为固化剂在淤泥中的投加量(质量分数)。

1.3 测试指标及方法

1.3.1 含水率

记坩埚质量为 W ,称取淤泥放入 600 ℃灼烧过的坩埚内,记录质量为 W_1 ,放入干燥箱于 105 ℃下烘干至恒重,冷却 0.5 h,称重记为 W_2 。淤泥含水率

$$W_c = (W_1 - W_2) / (W_1 - W) \times 100\% \quad (1)$$

1.3.2 淤泥液塑限及无侧限抗压强度

将固化剂按比例加入淤泥中,充分搅拌混合,使用 GYS-2 型光电式液塑限联合测定仪测量淤泥液塑限强度(分别表示淤泥从流动状态变为塑性状态,从塑性状态变为固体状态的最优含水率)。通过测试固化淤泥液塑限,选取最优含水率状态的固化淤泥,将固化土按原层次安放于桌面,用削土刀切削成稍大于试样直径及高度的土柱,放入切土盘对直径及高度精细修正,模具接触面涂抹凡士林,使用 YYW-2 型应变控制式无侧限压力仪测定无侧限抗压强度^[6]。

1.3.3 重金属浸出

原淤泥及固化淤泥的重金属浸出试验按照 HJ557—2009《固体废物浸出毒性浸出方法:水平振荡法》^[7]进行,取自然风干的土 25.0 g,过 5 mm 筛网后置于具盖广口聚乙烯瓶中,按固液比 1:20 加入浸提剂。将瓶子垂直固定在振荡器上,调节振动频率为(110±10)次/min,振幅 40 mm,室温下振荡 8 h,静置 16 h 后用中速定量滤纸过滤,收集全部滤液作为浸出液。浸出液重金属含量采用火焰原子吸收光谱仪(novAA300/FL,德国耶拿分析仪器股份公司)测定。

1.3.4 微观分析

将原始淤泥与固化淤泥经自然风干、研碎、过 200 目筛(筛孔尺寸 0.075 mm)后,105 ℃烘干,利用

表 5 正交实验方案

%

编号	水泥	粉煤灰	KPAM	磺化油
1	5	4	0.15	0.05
2	5	6	0.20	0.10
3	5	8	0.25	0.15
4	7	4	0.20	0.15
5	7	6	0.25	0.05
6	7	8	0.15	0.10
7	9	4	0.25	0.10
8	9	6	0.15	0.15
9	9	8	0.20	0.05

HITACHI S-3400N 型扫描电子显微镜进行结构观察;采用 Bruker D8 Advance 型 X 射线衍射仪进行组成分析^[8]。

2 结果与讨论

2.1 单一固化材料对淤泥的减水固化效果

研究不同固化材料在各掺量下淤泥含水率变化,比较固化材料的种类及掺量对淤泥固化效果的影响,结果如图 1~图 4 所示。

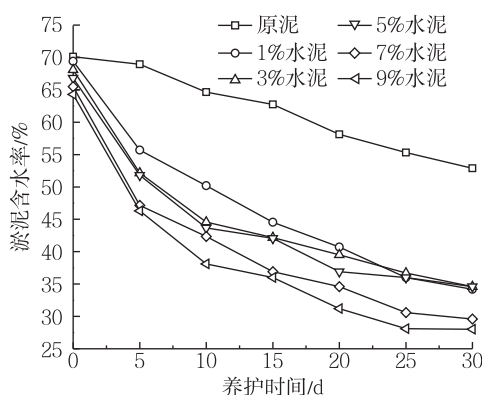


图 1 不同掺量水泥对淤泥固化效果

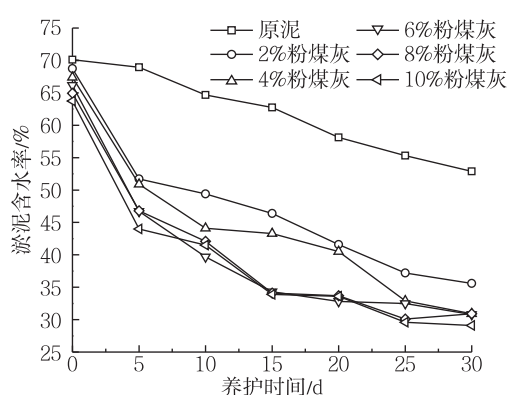


图 2 不同掺量粉煤灰对淤泥固化效果

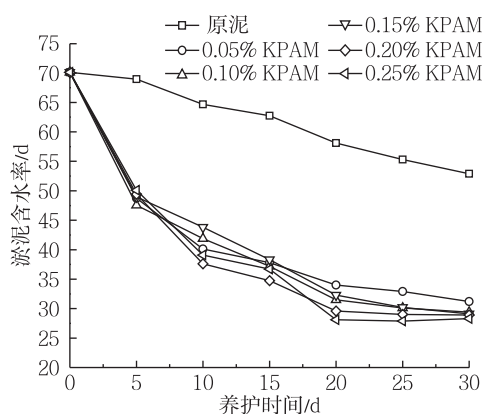


图 3 不同掺量 KPAM 对淤泥固化效果

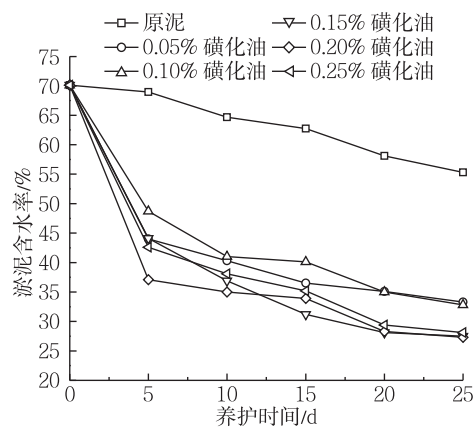


图 4 不同掺量磺化油对淤泥固化效果

由图 1、图 2 可知,使用单一固化材料对原泥进行固化,当水泥添加量为 5%、7% 及 9% 时,固化 25 d 后,淤泥含水率分别降至 31.4%、28.6% 及 28.1%,含水率接近于原泥塑限含水率,可以看出,若固化时间持续增长,在 25~30 d 段内,该 3 种掺量条件下淤泥含水率减小速率明显趋于平缓,接近最低含水率。而水泥掺量为 1%、3% 的实验组,相同时间内固化减水效果较高掺量实验组不明显,但在固化 25~30 d 段内,该 2 组实验中淤泥含水率仍继续减小。分析原因为:高掺量条件下,固化初期水泥能与淤泥中自由水充分反应,导致后期水合反应速率明显降低,而低掺量条件下水泥与原泥中的自由水有一个持续反应的过程^[9],所以存在低掺量条件下含水率在相同时间段内持续减小的情况。当粉煤灰添加量为 8%、10% 时,固化 25 d 后,淤泥含水率分别降至 30.1%、29.6%,且可以看出,随着固化时间延长,其减

水速率均开始减缓,含水率趋于稳定。将粉煤灰掺量为 2%,4%,6% 的实验组对比高掺量的 2 组实验,其规律与水泥单掺实验组类似,呈现出高掺量条件下减水速率快,低掺量条件下后期含水率持续降低趋势,因此分析粉煤灰高低掺量下含水率变化原理与水泥相同。

由图 3、图 4 可知, KPAM、磺化油均能在较低掺量下($<0.25\%$)对原泥产生较好的减水效果。当 KPAM 添加量为 0.1%, 固化 30 d 内淤泥含水率降低至 29.8%, 且该掺量条件下, 在相同固化时间内含水率降低量比掺量为 0.05% 实验组优异, 而其他 3 种不同掺量的实验组, 虽然添加量有不同程度的增加, 减水效果却没有比 0.1% 掺量组更明显。当磺化油添加量为 0.15% 时, 固化 30 d 内淤泥含水率降低至 28.7%, 当磺化油添加量为 0.25% 时, 淤泥前期含水率降低明显, 在固化时间为 5 d 时, 含水率已经降低至 36.7%。该两种固化材料均为高分子材料, 其作用效果主要是释放了淤泥内部结合水, 使其能够充分与空气接触, 因此含水率降低效果比无机类固化材料更强。

对比 4 种不同固化材料对淤泥减水效果曲线可知, 随着固化材料添加量的增加, 淤泥减水率均有不同程度提高, 且随着养护时间的增加减水率不断提高。对比原泥自然风干(空白实验组)含水率变化, 表明该 4 种固化材料对淤泥均有较好的减水效果。当粉煤灰添加量略高于水泥时, 在固化条件相同情况下其后期固化效果与水泥类似, 因此同样效果下, 可选用价格相对低廉的粉煤灰代替部分水泥的用量^[10]; KPAM 及磺化油的早期减水效果强于水泥及粉煤灰, 且达到相同减水率时, KPAM 及磺化油添加量远低于水泥和粉煤灰, 对淤泥减量化有更好效果。

2.2 多种固化材料复合固化效果

根据表 5 开展固化材料复合配方实验, 测量 15 d 内固化淤泥含水率变化如图 5 所示, 以固化时间 15 d 的含水率(表 6)进行极差分析, 结果见表 7。

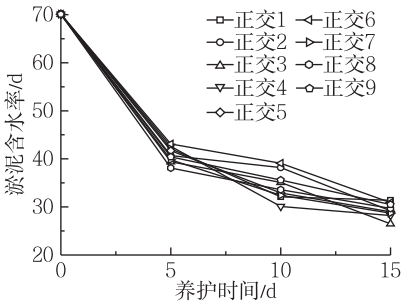


图 5 正交实验淤泥含水率变化

表 6 固化 15d 淤泥含水率 %

实验号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
固化 15 d 含水率	31.4	29.2	26.5	28.2	29.0	30.9	28.7	29.7	30.5

由图 5 可以看出, 表 6 中的 9 组实验在 15 d 时都已达到较优固化效果, 固化速率较单一固化材料有大幅提高, 淤泥含水率可降至单一使用 9% 水泥固化养护 25 d 的水平, 前期固化效果相对单一固化材料有明显提高。其减水效率提高的主要原因是各固化材料协同作用, 释放淤泥内部结合水, 通过反应及自然蒸发的方式将其与自由水一起减少。从图中含水率降低趋势可知, 淤泥含水率仍在持续降低, 说明复合固化剂减水反应仍未结束。

表 7 正交实验极差分析

分析指标	硅酸盐水泥	粉煤灰	KPAM	磺化油
K_1	29.03	29.43	30.67	30.30
K_2	29.37	29.30	29.30	29.60
K_3	29.63	29.30	28.07	28.13
R	0.60	0.13	2.60	2.17

由表 7 可以看出, 对于淤泥前期减水固化效果, 各固化材料的影响从大到小排序为 KPAM、磺化油、硅酸盐水泥、粉煤灰。表 7 中各因素 K 值变化并结合表 5 可看出, 减水固化效果最佳时硅酸盐水泥、粉煤灰、KPAM 和磺化油的用量分别为 5%, 6%, 0.2%, 0.15%。

2.3 液塑限及无侧限抗压强度

图 6 表示在最优固化材料掺量下(硅酸盐水泥 5%, 粉煤灰 6%, KPAM 0.2%, 磺化油 0.15%), 随

着养护时间的增加固化淤泥无侧限抗压强度变化情况,表 8 为淤泥固化前后液塑限对比。

由图 6 可见,早期无侧限抗压强度随着养护时间增加而增加,当养护时间达到 55 d 后无侧限抗压强度增加趋于平缓。养护 15 d 时无侧限抗压强度为 1.27 MPa,在养护时间为 15~55 d 段内时,由于水泥与粉煤灰不断进行水合反应,无侧限抗压强度增加至 3.04 MPa。将固化淤泥继续养护至 65 d 时无侧限抗压强度为 3.19 MPa,与固化 55 d 相比增加已经较不明显,表明水合反应基本结束。

表 8 中数据表示:固化处理后的淤泥相比原泥液塑限均有一定程度降低,由于固化剂中水泥及粉煤灰与淤泥中的水发生水合反应生成不溶于水的硅酸钙类物质,KPAM 及磺化油可改变土粒分子的亲水结构^[11],增强淤泥的阻水性能,并且 4 种固化材料均一定程度的减小了淤泥的孔隙率。因此固化后的淤泥从半固态转变为可塑界限的含水率增加量变低,同时由可塑状态转到流动状态的界限含水量也变低,经固化处理后的淤泥由高塑性土转变为低塑性土。

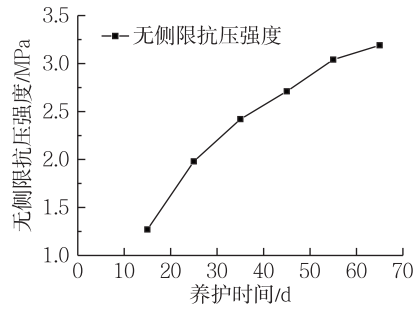


图 6 无侧限抗压强度

表 8 淤泥固化前后液塑限对比 %

实验样品	液限	塑限
原淤泥	60.4	29.7
固化淤泥	51.9	19.6

2.4 重金属浸出

表 9 为原淤泥及最优固化材料复合掺量下减水并养护 55 d 后,淤泥浸出液中重金属浓度测量结果。

表中重金属浸出液含量数据表明:淤泥在最优固化剂掺量下固化后,其重金属浸出液浓度远低于危废标准限值(GB 5085.3—2007)^[12],固化后淤泥的浸出液重金属含量相比原泥除未检测出项外均降低,说明固化材料的添加对淤泥中的重金属有一定的固化稳定作用。

表 9 重金属浸出质量浓度 mg/L

实验样品	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
原淤泥	0.89	0.32	0.06	—	0.02
固化淤泥	0.78	0.14	—	—	—

2.5 微观表征与固化机理分析

图 7(a),7(b)分别为烘干后原始淤泥及最优固化材料复合掺量下减水并养护 55 d 后淤泥的 SEM 图像。由图 7 可见,原始淤泥内部结构较为松散,而固化处理后的淤泥具有更高的密实度及较低孔隙率。该结构的形成主要是由于几种固化材料的协同作用,KPAM 为一种阳离子聚合物,其分子上带电部位可中和和污泥胶体颗粒所带负电荷,压缩双电层使其脱稳,并利用阳离子聚合物高分子的长链条作用把细小泥土颗粒吸附缠结在一起,结成较大颗粒,从而达到密实淤泥颗粒、降低淤泥含水率、减小淤泥内部孔隙度的目的。磺化油的作用机理类似于 KPAM,其本质是一种电解质,能溶于水,在水中可离解出带正电荷的阳离子和带负电荷的阴离子,离解出来的阳离子与土壤胶体颗粒表面的阳离子产生交换作用,赶走吸附在土壤胶体表面的亲水性阳离子,取而代之的是亲水性较低、黏结力较强的铝离子及其水合物^[13]。从微观 SEM 图像中还可推测出复合固化剂对淤泥重金属固化作用的主要机理:水泥及粉煤灰作为粘接剂,配合 KPAM 与磺化油使固化后的淤泥形成了一层密闭的低渗性外壳,将淤泥中的重金属固定在壳内。

对原泥及固化淤泥进行 XRD 分析,结果如图 8 及图 9 所示。对比两图可见,硅酸盐水泥与淤泥中水进行水合反应生成硅酸钙, $C_3S(Ca_3SiO_5)$ 是水泥的主要成分, C_3S 水合反应十分快速,通常在 28 d 内 C_3S

转变成水合产物,这导致了水泥硬化。粉煤灰的掺入提高了水泥的有效水灰比,使得水泥水化环境得到改善,水化程度提高;同时,也促使水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消耗^[14],有利于水泥水化反应进行。早期水泥水合反应对强度的提高起着主要作用,后期粉煤灰参与火山灰反应持续提高固化淤泥强度^[15]。

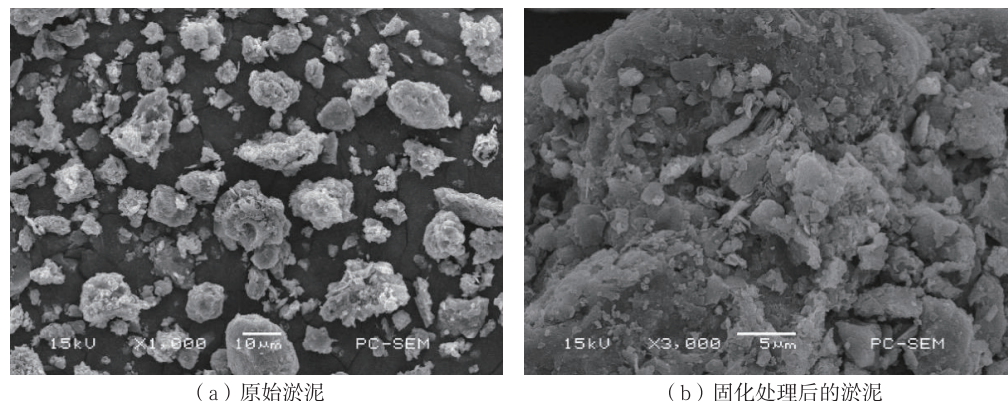


图 7 固化前后淤泥 SEM 图

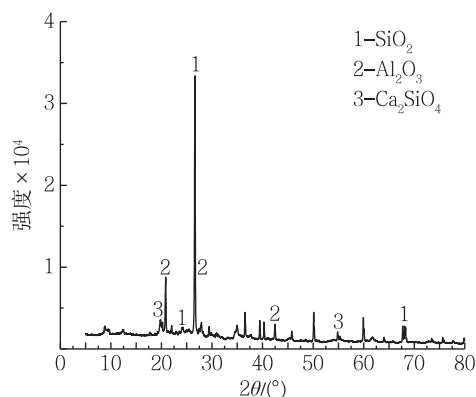


图 8 原泥 X 射线衍射图

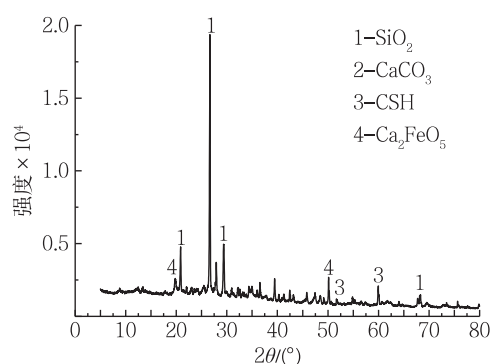


图 9 固化淤泥 X 射线衍射图

3 结 论

1) 硅酸盐水泥,粉煤灰,KPAM,磺化油对淤泥均有较优异的减水效果,KPAM 及磺化油减水与减水效果更强;固化材料最佳配比:5%硅酸盐水泥,6%粉煤灰,0.2%KPAM 及 0.15%磺化油。

2) 固化处理后淤泥由高塑性土转变为低塑性土,实验最佳状态下固化淤泥无侧限抗压强度达 3.19 MPa;固化材料的添加对淤泥中的重金属有一定的固化稳定作用。

3) KPAM 与磺化油的长链条作用使淤泥内部结构密实,水泥及粉煤灰与淤泥中水产生的水化及火山灰反应使固化淤泥强度提升。

参考文献:

- [1] ZENTAR R, DUBOIS V, ABRIAK N E. Mechanical behaviour and environmental impacts of a test road built with marine dredged sediments [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2008, 52(6): 947-954.
- [2] DUBOIS V, ABRIAK N E, ZENTAR R. The use of marine sediments as a pavement base material [J]. Waste Management, 2009, 29: 774-782.

参考文献:

- [1]SHI C, ZHAO Q, HU Z, et al. Precise relative positioning using real tracking data from compass GEO and IGSO satellites[J]. GPS Solutions, 2013, 17(1):103-119.
- [2]LI J, YANG Y, XU J, et al. GNSS multi-carrier fast partial ambiguity resolution strategy tested with real BDS/GPS dual- and triple-frequency observations[J]. GPS Solutions, 2013, 19(1):5-13.
- [3]XU J, YANG Y, LI J, et al. Performance analysis of compass/GPS code differential positioning[C]// CSNC'12, Beijing: China Satellite Navigation Annual Academic Committee, 2013:201-209.
- [4]孙自法, 张磊, 詹正旗. 北斗与“羲和”联手中国卫星导航“登堂入室”[J]. 中国测绘, 2013(4):50.
- [5]LU N, CHENG N, ZHANG N, et al. Wi-Fi hotspot at signalized intersection: cost-effectiveness for vehicular internet access[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(5):3506-3518.
- [6]陈雷, 韩帅, 邹德岳, 等. 基于北斗指纹节点的室内外无缝导航定位系统的设计[C]//中国卫星导航学术年会. 武汉: [s.n.], 2013.
- [7]LOTT M, FORKEL I. A multi-wall-and-floor model for indoor radio propagation[C/OL]// IEEE VTS 2001. Piscataway: IEEE Press, 2001:464-468.
- [8]KAEMARUNGS K, KRISHNAMURTHY P. Modeling of indoor positioning systems based on location fingerprinting[C]// International Symposium on Optical Science & Technology. Piscataway: IEEE Press, 2004: 1012-1022.
- [9]江城. 基于北斗终端的室内外无缝定位系统设计[J]. 无线电工程, 2016, 46(8):38-42.
- [10]BAHL P, PADMANABHAN V N. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system[C]// INFOCOM 2000. Piscataway: IEEE Press, 2000:775-784.

(责任编辑:李艳)

【上接第 65 页】

- [3]BAI F Y. The research of the river sludge as road subgrade filling materials in big city[C]//Trans Tech Publications, Engineering and Industry Technology Institute(EITD). [S.l.]: [s.n.], 2014:9.
- [4]LI C, LIN D F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement [J]. Journal of Hazardous Journal of Hazardous, 2009, 162:321-327.
- [5]程福周, 雷学文, 孟庆山. 水泥及其外加剂固化淤泥的试验研究[J]. 建筑学, 2014, 30(9):51-55.
- [6]中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T50123—1999 [S]. 北京:中国计划出版社, 1999.
- [7]中华人民共和国环境保护部. 固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法:HJ557—2010[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2010.
- [8]王清涛, 李森, 于华芹. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报, 2018(4):1393-1398.
- [9]张庆. 固化疏浚淤泥-磷石膏混合土工程性质及膨胀特性研究[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
- [10]王清涛, 李森, 于华芹. 利用赤泥制备轻质高强保温装饰一体化建筑材料[J]. 硅酸盐通报, 2018(4):1393-1398.
- [11]卢雪松. 离子土壤固化剂加固武汉红色粘土的试验效果及其机理研究[D]. 北京:中国地质大学, 2010.
- [12]中国环境科学研究所固体废物污染控制技术研究所, 环境标准研究所. 危险废物鉴别标准:浸出毒性鉴别 GB5085.3—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2007:25.
- [13]滕维民, 李明宇. 浅谈 ISS 固化剂的原理及特点[J]. 黑龙江交通科技, 2010, 33(1):50.
- [14]张云升, 孙伟, 郑克仁. 水泥-粉煤灰浆体的水化反应进程[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006(1):118-123.
- [15]彭丽思, 付广义, 陈繁忠. 城市河道底泥的固化处理及机理探讨[J]. 环境工程, 2016, 34(S1):747-752.

(责任编辑:李艳)